

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.268>



# 基于转移函数分析的蒙东地区不同类型植被变化对干旱的响应

尉毓姣<sup>1,2,3</sup>, 朱琳<sup>1,2,3\*</sup>, 曹鑫宇<sup>1,2,3</sup>, 余慧琳<sup>1,2,3</sup>

1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048
2. 城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048
3. 首都师范大学水资源安全北京实验室, 北京 100048

**摘要:** 为了量化不同类型植被与干旱的响应关系, 首先采用回归模式降尺度方法获取内蒙古地区 1982—2019 年 1 km 分辨率的归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 数据集, 并计算标准化降水蒸发指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 以表征干旱状况; 然后, 利用转移函数分析 (transfer function analysis, TFA) 频域技术进行内蒙古东部不同类型植被变化对干旱响应的存在性、强度和时滞性的研究。发现在年、6 个月和 3 个月尺度上, 草地、灌木、阔叶林和针叶林 NDVI 与 SPEI 的相干性分别为 0.44、0.57、0.31、0.43、0.60、0.32、0.30、0.19、0.14 和 0.20、0.13、0.10; 各类型植被 NDVI 对干旱的响应强度表现为灌木 > 草地 > 阔叶林 > 针叶林; 草地、灌木、阔叶林和针叶林在 3 个时间尺度上滞后干旱的时间分别为 31 d、20 d、12 d、77 d、28 d、34 d、120 d、69 d、57 d 和 179 d、103 d、65 d。研究结果表明: 草地和灌木与干旱的相干性显著, 响应强度较大, 响应速度更快; 而针叶林和阔叶林与干旱的相干性较低, 其对干旱的抵抗力较强, 对干旱的响应时间较长, 受干旱影响较小。

**关键词:** NDVI; SPEI; 干旱; 转移函数分析; 响应关系; 遥感; 生态学。

中图分类号: P951

文章编号: 1000-2383(2023)09-3539-13

收稿日期: 2022-04-18

## Response of Different Types of Vegetation Changes to Drought in Eastern Inner Mongolia Based on Transfer Function Analysis

Wei Yujiao<sup>1,2,3</sup>, Zhu Lin<sup>1,2,3\*</sup>, Cao Xinyu<sup>1,2,3</sup>, Yu Huilin<sup>1,2,3</sup>

1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China
2. Base of the State Key Laboratory of Urban Environmental Process and Digital Modeling, Beijing 100048, China
3. Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048, China

**Abstract:** To quantify the response relationships between different types of vegetation and drought, firstly, the dataset of normalized difference vegetation index (NDVI) with a resolution of 1 km in Inner Mongolia from 1982 to 2019 was obtained through regression model downscaling method and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) was calculated for characterizing drought conditions. Then, the frequency domain technique of transfer function analysis (TFA) was used to explore the existence, intensity and time delay of the response of different types of vegetation changes to drought in eastern Inner

**基金项目:** 北京市自然科学基金项目 (No. 8202008)。

**作者简介:** 尉毓姣 (1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态环境遥感研究。ORCID: 0000-0002-7208-0068. E-mail: 834226596@qq.com

\* **通讯作者:** 朱琳, ORCID: 0000-0003-2725-6666. E-mail: lin.zhu@cnu.edu.cn

**引用格式:** 尉毓姣, 朱琳, 曹鑫宇, 余慧琳, 2023. 基于转移函数分析的蒙东地区不同类型植被变化对干旱的响应. 地球科学, 48(9): 3539—3551.

**Citation:** Wei Yujiao, Zhu Lin, Cao Xinyu, Yu Huilin, 2023. Response of Different Types of Vegetation Changes to Drought in Eastern Inner Mongolia Based on Transfer Function Analysis. *Earth Science*, 48(9): 3539—3551.

Mongolia. It was found that the coherence between NDVI and SPEI of grassland, shrub, broad-leaved forest and coniferous forest was 0.44, 0.57, 0.31, 0.43, 0.60, 0.32, 0.30, 0.19, 0.14 and 0.20, 0.13, 0.10 on annual, 6 months and 3 months scales, respectively. The response intensity of NDVI of various types of vegetation to drought showed that the shrub was stronger than that of grassland. The following was broad-leaved forest. The response intensity of NDVI of coniferous forest was weakest. The lag times of the NDVI of grassland, shrub, broad-leaved forest and coniferous forest on drought at three time scales for were 31, 20, 12 days, 77, 28, 34 days, 120, 69, 57 days and 179, 103, 65 days, respectively. The results show that grassland and shrub have significant coherence with drought, strong response intensity and faster response speed. However, coniferous forest and broad-leaved forest have low coherence with drought, strong resistance to drought, long response time to drought and less affected by drought.

**Key words:** NDVI; SPEI; drought; transfer function analysis; response relationships; remote sensing; ecology.

## 0 引言

植被作为生态系统的重要组分,在保持水土、调节气候以及控制能量平衡等方面发挥着重要的作用(向菲菲等, 1998; Jia *et al.*, 2014).在全球气候变化的背景下,干旱的频繁发生对生态系统造成了巨大影响(Barbosa *et al.*, 2019; Tollefson, 2021).内蒙古地区是中国北部重要的生态屏障,也是气候变化的敏感区域,深入开展干旱影响下的植被响应研究对该地区生态保护具有重要意义(孙艳玲等, 2010; Cao *et al.*, 2018).

气候干旱指数是旱情描述的数值表达,而标准化降水蒸发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)是应用最广泛的评估区域干旱状况的指标(Vicente-Serrano *et al.*, 2015; 汪青春等, 2015).归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)被认为是监测植被和生态变化的最佳指标,其对植被生长高度敏感(杨玲莉, 2016).目前,学者们利用NDVI数据集和SPEI干旱指数,在国内外开展了植被时空变化对干旱的响应研究.孔冬冬等(2016)利用皮尔逊相关系数研究了中国不同地区植被对多时间尺度干旱(1~24个月)的响应特征,发现大部分地区植被受干旱的影响较大,草地受干旱的影响最大.Liu *et al.*(2019)分析了1998—2013年内蒙古地区植被生长与干旱的相关性,结果表明在6个月和12个月尺度上,NDVI与SPEI在大部分地区呈显著正相关,干旱对内蒙古植被变化的影响较大,但对东部森林和西部沙漠的影响较小.Khatri-Chhetri *et al.*(2021)评价了2000—2015年美国西南部不同季节、不同植被类型NDVI和SPEI之间的相关性,指出草地和灌木丛植被NDVI与夏季

SPEI相关性较强,森林NDVI与冬季SPEI相关性较强.Li *et al.*(2018)利用NDVI和SPEI,通过计算二者的最大皮尔逊相关系数,分析了1982—2015年内蒙古高原植被对干旱的响应,结果表明该地区草原植被对较短时间尺度的干旱敏感,而森林、荒漠植被对较长时间尺度的干旱敏感;并指出空间分辨率较低的气温降水数据会产生研究结果的不确定性.

目前,学者通常采用皮尔逊相关系数确定植被与干旱之间的关系(相关性、滞后性),该方法得到的滞后时间均为采样间隔的整数倍,不够精确(Cai *et al.*, 2021; Zhong *et al.*, 2021; Zuo *et al.*, 2021).干旱具有多时间尺度的特征,识别植被与干旱相关的显著时间尺度也至关重要(Vicente-Serrano *et al.*, 2013).以往采用皮尔逊相关系数进行植被与干旱的响应关系研究中,需要将不同时间尺度下的NDVI与SPEI分别做相关分析,才能得到二者相关性更高的时间尺度(Zhou *et al.*, 2021).转移函数分析(transfer function analysis, TFA)方法是一种频域技术,其由3个参数组成:增益、相干性和相位,主要用于评估人脑的动态自我调节功能(Zhang *et al.*, 1998).Zhou *et al.*(2021)将TFA方法用于分析多个时间尺度上萨赫勒—苏丹—几内亚地区植被对降雨的响应,结果表明该方法可以量化植被—降雨在不同时间尺度上的响应关系.相比皮尔逊相关系数, TFA能够在获取植被与干旱相干性和时滞性的同时,有效量化植被变化对干旱响应的强度,并且其获取的滞后时间更加精确(以天为单位),同时可以直接在频率谱上识别显著的响应时间尺度(Zhou *et al.*, 2021).

由于单一传感器获取的NDVI数据集存在时序短或空间分辨率低的问题,并且植被对干旱响应的研究受到方法选择的限制,本文首先基于GIMMS NDVI3g和SPOT-VGT NDVI数据集,采用回归模式降尺度的方法获取内蒙古地区1982—2019年长时间序列1 km空间分辨率的NDVI数据集;其次,以逐月平均气温、降水栅格数据为基础,计算SPEI干旱指数;然后,以植被类型较为丰富的内蒙古东部(以下简称“蒙东”)为典型区,分别计算草地、灌木、针叶林和阔叶林所在栅格处的NDVI和SPEI的平均值,基于提取的NDVI与SPEI月时间序列,采用TFA频域技术探讨该地区不同类型植被变化对干旱的响应特征,包括植被变化对干旱响应的存在性、强度和时滞性.研究结果对该地区生态保护、水资源管理具有指导意义.

### 1 研究区概况

内蒙古地区(97°12' ~ 126°04'E, 37°24' ~ 53°23'N)位于中国的北部边疆,横跨东北、华北、西北地区(图1).全区总面积为118.3万km<sup>2</sup>,占中国土地面积的12.3%.内蒙古管辖12个地级行政区,依照《中国气象地理区划》将内蒙古分为蒙东、蒙中和蒙西三部分(杨舒畅和杨恒山, 2019).区内气候以温带大陆性季风气候为主,1982—2019年平均气温为4℃,平均降水量为291 mm,降水量少而不匀.内蒙古自东向西分布森林、草原、荒漠等自然景观,东部植被类型相对丰富,全区草原面积广阔,占土地总面积的66.8%(佟斯琴, 2019).截止2020年,全区森林面积为26.15万km<sup>2</sup>,森林覆盖率为23%,林区面积居全国第一(据国民经济和社会发展统计公报).

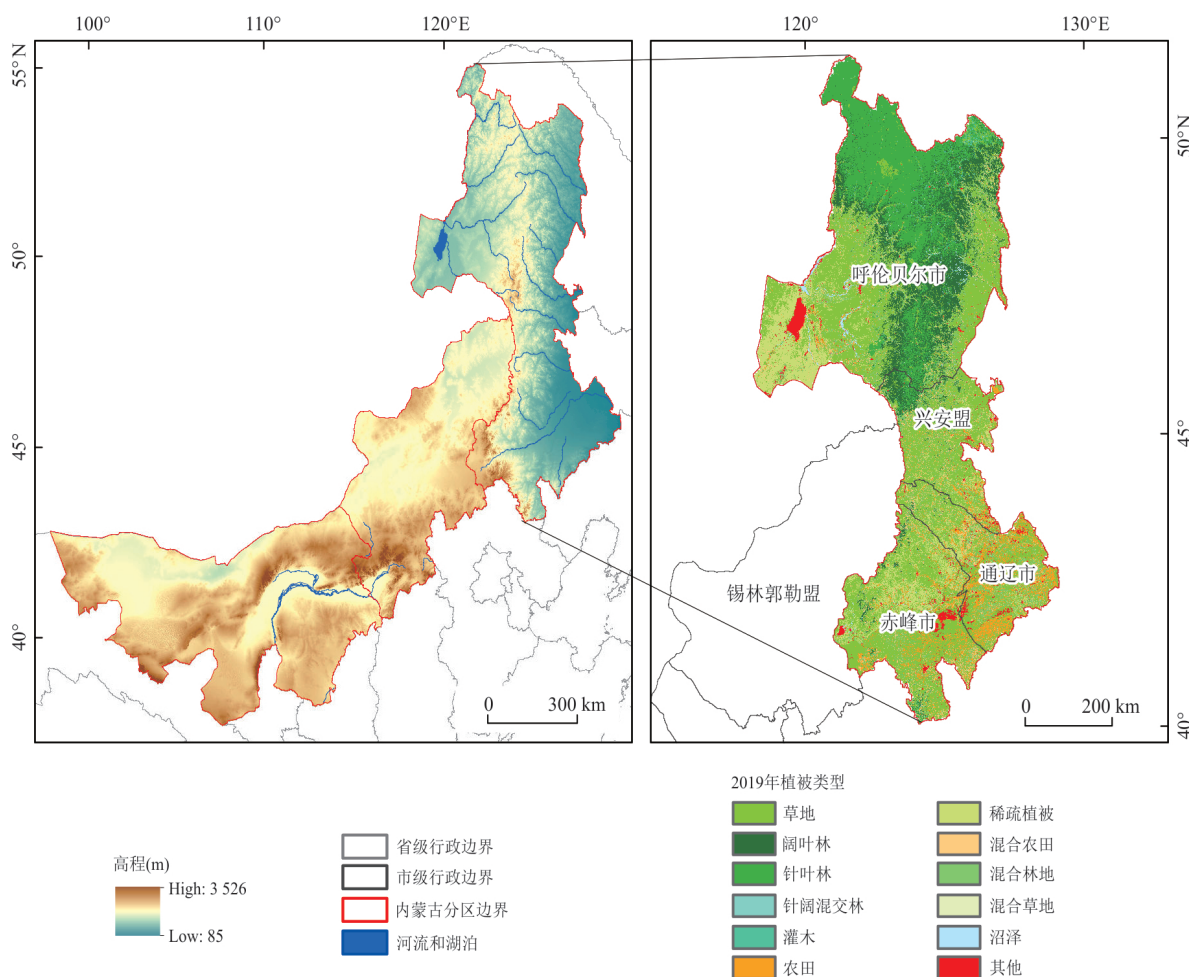


图1 研究区2019年植被类型分布

Fig.1 Distribution of the study area and vegetation types in 2019

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源与预处理

**2.1.1 NDVI 数据集** (1) SPOT-VGT NDVI. SPOT-VGT NDVI 数据集由 SPOT-4 卫星搭载的 VEGETATION 传感器获取, 为 10 d 合成数据 (戴声佩等, 2010). 本次采用逐月 SPOT-VGT NDVI, 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心网站 (<http://www.resdc.cn/Default.aspx>), 选取的时间范围为 1999—2019 年, 空间分辨率为 1 km, 共 252 幅图像.

(2) GIMMS NDVI3g. GIMMS NDVI3g 数据集来源于美国航空航天局 (<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>), 时间覆盖范围为 1982—2015 年, 空间分辨率为 8 km, 时间分辨率为 15 d (崔利芳等, 2020). 该数据格式为 .nc4, 为方便后续处理, 本次将其转换为 Geotiff 格式, 共 408 幅图像, 并将 GIMMS NDVI3g 重采样至 1 km, 便于后续与 SPOT-VGT NDVI 建立回归方程 (杨江州等, 2020).

两类 NDVI 数据集均采用 WGS 1984 地理坐标和 Albers Equal-Area Conic 投影, 通过批量裁剪获得研究区的 NDVI 数据集. 对于半月尺度的 GIMMS NDVI3g, 采用最大值合成法 (maximum value composites, MVC) 合成月尺度的 NDVI 数据集, 该方法可消除云、大气等的影响 (Holben, 1986).

**2.1.2 气象数据** 气象栅格数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>) 提供的 1982—2019 年中国逐月降水、平均气温数据集, 空间分辨率为 1 km. 该数据根据气候研究中心发布的长时间序列、低空间分辨率的气候数据集进行空间降尺度处理生成 (Peng *et al.*, 2019). 本文利用 ArcGIS10.5 中的 NetCDF-time-slice-to-Raster 工具将原数据格式 (.nc) 转换为 Geotiff 格式, 共 912 幅图像. 采用与 NDVI 数据集相同的坐标系统, 并批量裁剪获得研究区的逐月平均气温、降水数据.

**2.1.3 植被类型数据** 植被类型数据来源于欧洲航天局研制的全球土地覆盖数据集 (<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>), 空间分辨率为 300 m, 时间覆盖范围为 1992—2019 年 (刘静等, 2020). 本文利用 ArcGIS10.5 提取针叶林、阔叶林、灌木、草地

4 种分布面积较大的植被类型. 考虑到本次研究的时间跨度较大, 植被类型不可避免地会产生变化, 故采用 1992 年、2000 年、2010 年和 2019 年 4 期土地覆盖数据分时段 (1982—1992 年、1993—2000 年、2001—2010 年、2011—2019 年) 提取不同类型植被的 NDVI 和 SPEI.

### 2.2 研究方法

**2.2.1 回归模式降尺度** 回归模式法是应用最早、最广泛的用于建立预报变量与预测因子之间线性或非线性关系的统计降尺度方法 (Huth, 2002). 本文借助 IDL 编程语言, 基于 1982—2015 年 GIMMS NDVI3g (8 km) 与 1999—2019 年 SPOT-VGT NDVI (1 km) 的重叠年份 2000—2015 年的月尺度数据进行逐像元回归分析, 线性回归方程如下 (杨江州等, 2020):

$$GN_i = a \times SN_i + b + c_i, \quad (1)$$

式中,  $GN_i$  为第  $i$  月的 GIMMS NDVI3g;  $SN_i$  为第  $i$  月的 SPOT-VGT NDVI;  $a$  和  $b$  为常数;  $c_i$  为残差.

通过回归方程的建立, 获取常数  $a$  和  $b$ , 然后将 1982—1999 年的 GIMMS NDVI3g (8 km) 回代入方程得到 1 km 分辨率的月 NDVI, 最后对降尺度后的数据进行精度验证.

**2.2.2 标准化降水蒸发指数 (SPEI)** SPEI 是降水量与潜在蒸散量差值序列的累积概率做正态标准化后的干旱指数, 通过引入温度对潜在蒸散的影响, 改进了仅基于降水数据的标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI) 的性能 (Vicente-Serrano *et al.*, 2013). 本文基于 1982—2019 年逐月平均气温、降水栅格数据, 进行 SPEI 的逐像元计算, 具体计算公式可以在 Vicente-Serrano *et al.* (2010) 和 Beguería *et al.* (2014) 中查阅.

**2.2.3 转移函数分析 (TFA)** TFA 方法的最初目的是在假设人脑血管自动调节系统为线性控制系统的情况下, 估计反映其动态行为的参数 (Claassen *et al.*, 2016). 该方法使用频谱分析算法 (快速傅立叶变换) 将时域信号进行采样转为频域信号, 即将信号分解为多个频率的正弦和余弦之和, 从而获得时域信号在频域中的频谱估计, 然后使用自谱和互谱获得相干函数、振幅 (增益) 和相位频率响应的估计. 在线性假设下, 输入端的正弦波将转换为输出端相同频率的正弦波, 但具有 (与频率相关的) 不同的振幅 (增益), 并且通常会发生时间偏移 (相位) (Claassen *et al.*, 2016). 在频域中, SPEI 和 NDVI 信

号的振幅波动的复杂模式可以看作是许多独立的,在不同频率、不同幅度和相位角下振荡的波形分量总和(Zhou *et al.*, 2021).

一个未知系统的转移函数由3个参数组成:相干性、增益和相位,可根据交叉谱理论从输出和输入信号中估计(Zhang *et al.*, 1998).给定两个信号  $x(t)$  和  $y(t)$ ,两个信号之间的转移函数  $H(f)$  为:

$$H(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)}, \quad (2)$$

式中,  $S_{xx}(f)$  为  $x$  信号的频谱;  $S_{xy}(f)$  是两个信号的交叉频谱. 转移函数的增益  $|H(f)|$  和相位谱  $\Phi(f)$  由复转移函数的实部  $H_r(f)$  和虚部  $H_i(f)$  导出:

$$|H(f)| = \left\{ [H_r(f)]^2 + [H_i(f)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

$$\Phi(f) = \arctan \left[ \frac{H_i(f)}{H_r(f)} \right], \quad (4)$$

用相干函数评价  $x(t)$  和  $y(t)$  之间关系的存在性  $\theta(f)$ , 定义为:

$$\theta(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f) \times S_{yy}(f)}, \quad (5)$$

相干性 ( $\theta(f)$ ) 用来衡量两个信号之间的响应是否存在,其值介于0和1之间,类似相关系数的平方. 增益 ( $|H(f)|$ ) 测量了响应系统的强度,即不同时间尺度的干旱导致植被 NDVI 的变化量. 相位 ( $\Phi(f)$ ) 滞后可转换为时域中的时间滞后,由响应系统的速度决定,随植被类型、气候条件和时间尺度而变化,负相位滞后代表 NDVI 的变化滞后于 SPEI, 正相位则表示 NDVI 的变化领先于 SPEI 信号(Zhou *et al.*, 2021).

奈奎斯特-香农采样定理指出,给定信号中的最高可分辨频率(即奈奎斯特频率)等于采样频率的一半,频率高于奈奎斯特频率的信号分量信息将失真(Zhou *et al.*, 2021). 在频域分析中,频率是振荡周期的倒数,NDVI 和 SPEI 序列时间分辨率为一个月(约  $30 \times 24 \times 60 \times 60$  s),采样频率约为  $1/(30 \times 24 \times 60 \times 60)$  Hz(即 380 nHz). 所以两个信号的奈奎斯特频率都是 190 nHz,观测到的最快振荡周期约为 60 d,因此本文最短的时间尺度(物理上有意义的)也是 60 d,在小于 60 d 的尺度上噪声较多.

本文将 TFA 方法应用于 NDVI 与 SPEI 的月尺度时间序列,采用 python 包装器—mtspec 包实现该方法的具体计算过程,该包基于多锥谱估计库估计

功率谱(Prieto *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2021). mtspec 包通过输入时域信号(SPEI 和 NDVI 序列)以及相应的采样频率(如本文的 380 nHz),实现公式(2)~公式(5)的计算,最终得到两个时域信号在频域内的相干性、增益和相位,并且能够同时识别出具有明显尺度特征的频域窗口.

本次采用刀切法在 95% 置信水平上估计相干性的显著性阈值,即如果给定频率的相干性大于阈值,则该频率的响应关系具有统计显著性(Prieto *et al.*, 2009). 对于响应关系显著的时间  $P$  (以天为单位),TFA 估计的 NDVI 与 SPEI 两个信号之间的相位滞后为  $\varrho$  (以弧度表示),可应用公式(6)转换为相应的时域内的时间滞后 ( $\tau$ ) (以天为单位).

$$\tau = \frac{\varrho}{\pi} \times P. \quad (6)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 NDVI 降尺度数据及精度验证

由于 1999 年 SPOT-VGT NDVI 数据未参与上述线性回归分析,故以 1999 年降尺度的 NDVI 为例说明降尺度的效果. 本文采用 python 编程语言对 1999 年 1 月至 12 月的 SPOT NDVI 与降尺度后的 GIMMS NDVI 所有栅格点(113 万个)分别进行相关系数的计算,结果(表 1)表明相关系数范围为 0.78~0.98,随着月份的增加,相关系数先变大后变小. 1 月、2 月、12 月属于冬季,植被分布较少,相关系数与其他月份相比偏低; 6 月、7 月、8 月属于夏季,植被茂盛,相关系数整体较高,降尺度效果最好. 1999 年 SPOT NDVI 与降尺度后的 GIMMS NDVI 的月平均相关系数为 0.9,说明降尺度得到的 NDVI 数据可靠.

图 2 为 1999 年 8 月 8 km GIMMS NDVI、1 km GIMMS NDVI 与 1 km SPOT-VGT NDVI 的空间对比图. 降尺度后的数据更加清晰,局部放大图显示出 NDVI 的细节特征. 原始 GIMMS NDVI、降尺度后的 GIMMS NDVI 和 SPOT-VGT NDVI 的平均值分别为 0.456、0.449 和 0.443, NDVI 最大值、最小值以及均值均相差不大,整体分布状况较为一致.

#### 3.2 1982—2019 年内蒙古地区干旱监测结果

本文采用月尺度的 SPEI(SPEI-1)对内蒙古地区的干旱进行监测. 1982—2019 年 SPEI-1 变化图(图 3)显示, SPEI-1 数值波动频率很高,变化幅度较大,能够反映该地区水分盈亏的细节性变化. 随着

表 1 1999 年 1-12 月 SPOT NDVI 与降尺度后的 GIMMS NDVI 的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between SPOT NDVI and the downscaled GIMMS NDVI from January to December in 1999

月份	皮尔逊相关系数( $r$ )
1月	0.78
2月	0.79
3月	0.88
4月	0.92
5月	0.96
6月	0.98
7月	0.98
8月	0.98
9月	0.97
10月	0.93
11月	0.88
12月	0.81

时间的推移,  $SPEI \leq -0.5$  的值增多, 即内蒙古地区干旱发生的次数有所增加, 这与佟斯琴 (2019)、An *et al.* (2020)、覃艺等 (2021) 对于内蒙古干旱同时段的监测结果一致。

### 3.3 蒙东地区不同类型植被变化与干旱的响应关系

在频域中, 频率呈指数增长, 为体现出明显的时间尺度特征, 本文对图 4 至图 8 横坐标取对数显示。不同类型植被 NDVI 和 SPEI 时域信号转为频域信号后的频率谱 (图 4 和图 5) 显示, NDVI 和 SPEI 的信号峰值均出现在 365 d 左右, 在年周期上分布较多的能量, 体现出年尺度特征。另外, SPEI 信号在 182 d 左右和 91 d 左右的能量分布也比较多, 体现出 6 个月和 3 个月的时间尺度特征, 但其波动明显, 说明干旱虽然具有多时间尺度的特征, 但在不同尺度上的变化较不稳定。

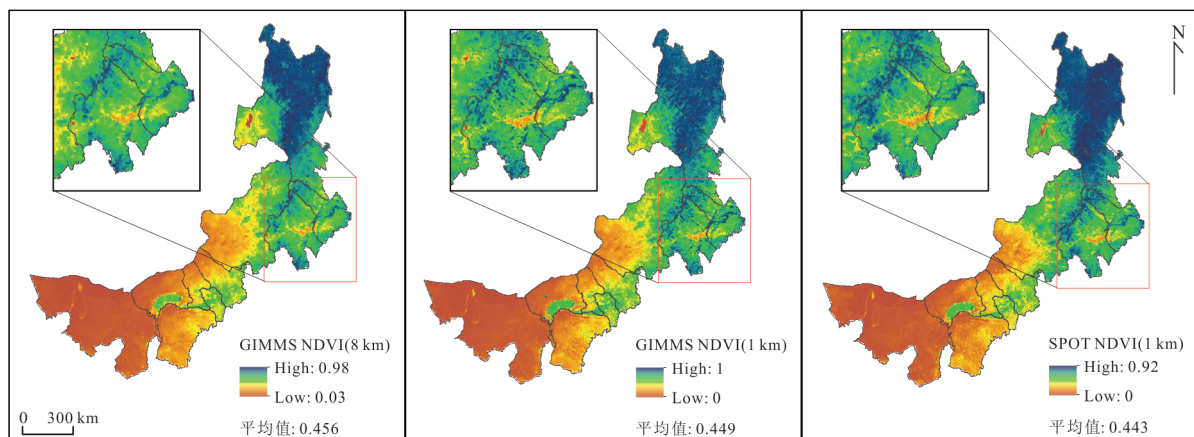


图 2 1999 年 8 月降尺度后的 GIMMS NDVI 与原数据、SPOT-VGT NDVI 对比

Fig.2 Comparison of the GIMMS NDVI, the downscaled GIMMS NDVI and SPOT-VGT NDVI in August 1999

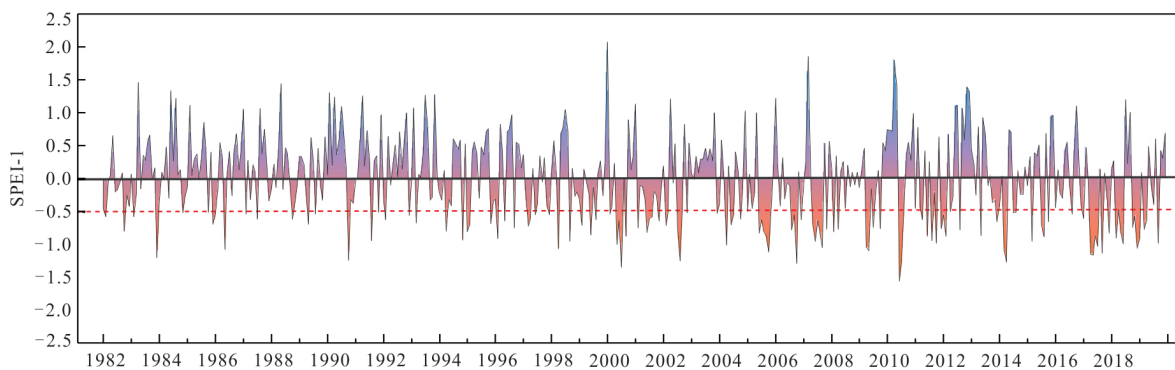


图 3 1982—2019 年内蒙古地区月尺度干旱监测结果

Fig.3 Drought monitoring results at the monthly scale in Inner Mongolia from 1982 to 2019

图中红色虚线为干旱发生的阈值(气象干旱等级标准:GB/T20481-2017)

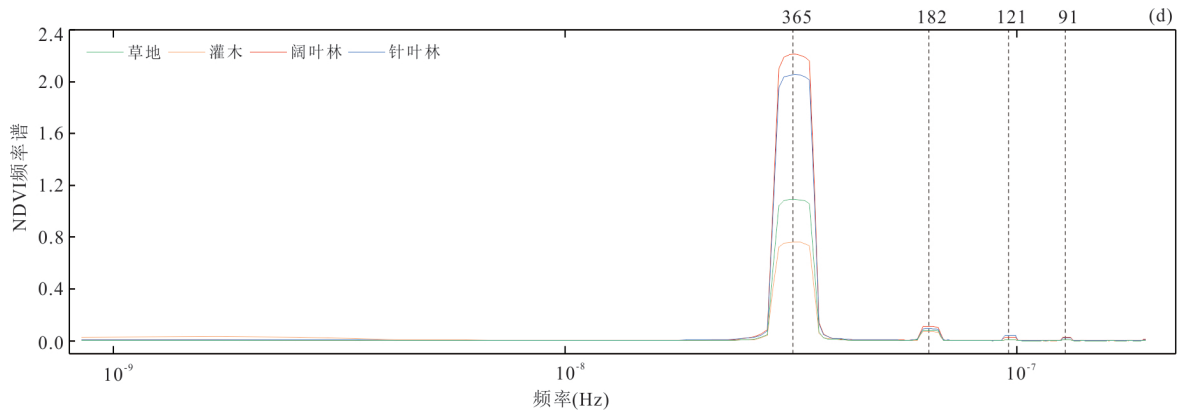


图 4 1982—2019 年蒙东地区不同类型植被 NDVI 的频率谱

Fig.4 Frequency spectrum of NDVI of different types of vegetation in eastern Inner Mongolia from 1982 to 2019

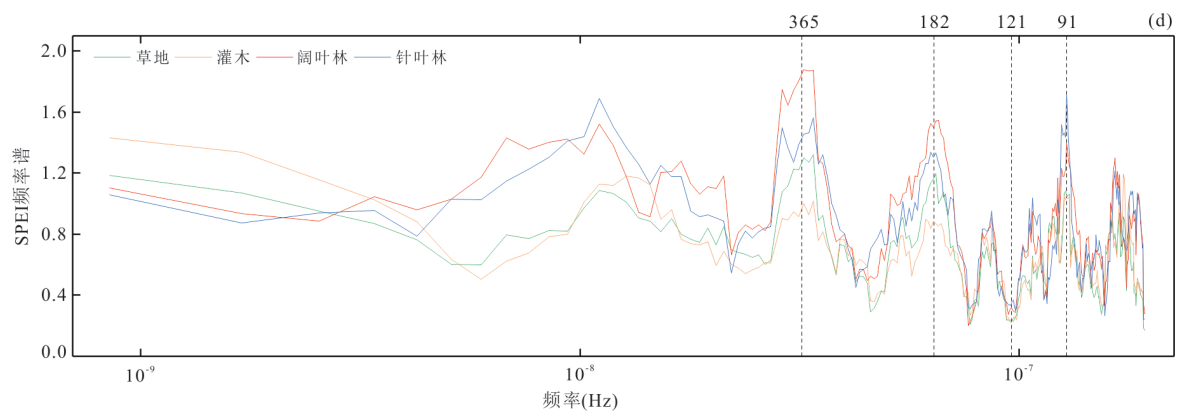


图 5 1982—2019 年内蒙古东部不同类型植被 SPEI 的频率谱

Fig.5 Frequency spectrum of SPEI of different types of vegetation in eastern Inner Mongolia from 1982 to 2019

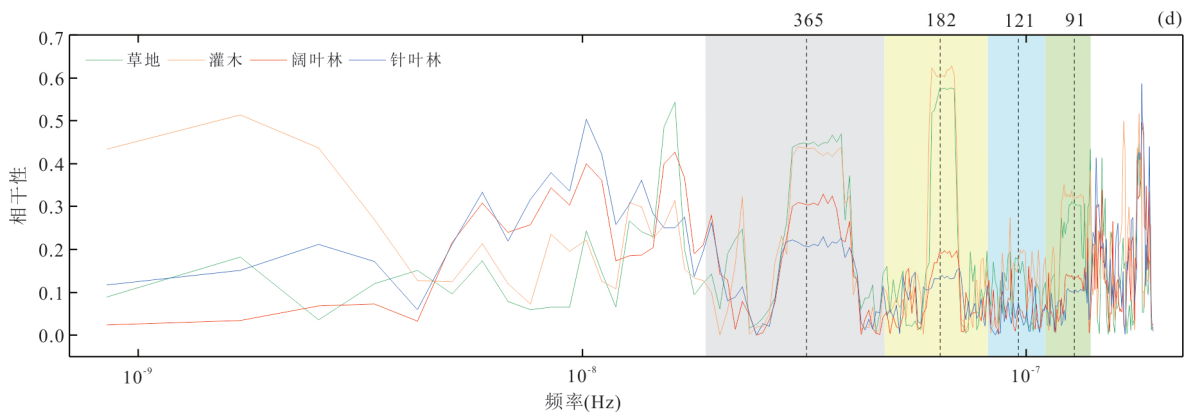


图 6 1982—2019 年蒙东地区不同类型植被 NDVI 与 SPEI 的相干谱

Fig.6 Coherence spectrum between NDVI and SPEI of different types of vegetation in eastern Inner Mongolia from 1982 to 2019

在极高频部分(频率大于  $1.93 \times 10^{-7}$ , 即时间尺度小于 60 d)存在较多噪声,且不具有物理意义,本文不做分析,主要针对 3 个月、6 个月和年尺度进行探讨。

**3.3.1 不同类型植被变化与干旱的相干性** 1982—

2019 年蒙东地区草地、灌木、阔叶林、针叶林 NDVI 与 SPEI 的相干谱(图 6)显示,植被对干旱的响应主要出现在年、6 个月和 3 个月尺度上,不同植被类型存在差异.草地和灌木 NDVI 与 SPEI 在 6 个月尺度上相干性最大,相干性分别为 0.57 和 0.62;其次为

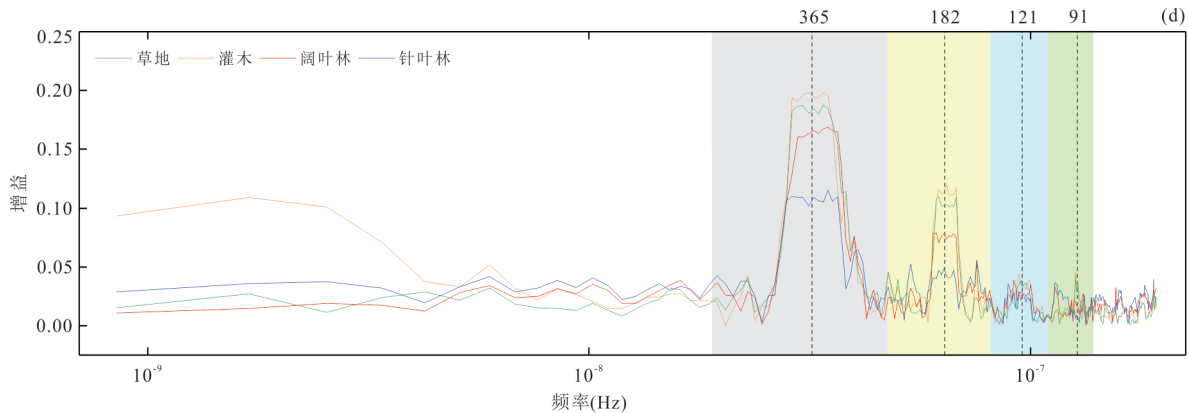


图7 1982—2019年蒙东地区不同类型植被NDVI与SPEI的增益谱

Fig.7 Gain spectrum of NDVI to SPEI of different types of vegetation in eastern Inner Mongolia from 1982 to 2019

年尺度,相干性分别为0.44和0.43;3个月尺度上的相干性分别为0.31和0.32.阔叶林和针叶林NDVI与SPEI在3个尺度上的相干性均小于草地和灌木,其中年尺度上相干性最大,相干性分别为0.32和0.22;其次为6个月尺度,相干性分别为0.19和0.13;3个月尺度上的相干性分别为0.14和0.1.在极低频的相干谱上即年际尺度上,不同植被类型的NDVI与SPEI也存在相干性较高的时段,但波动性较大,没有明显的响应特征.

**3.3.2 不同类型植被变化对干旱的响应强度**  
1982—2019年蒙东地区草地、灌木、阔叶林、针叶林NDVI对SPEI响应的增益谱(图7)显示有明显的峰值,表明植被NDVI在年、6个月尺度上对SPEI的响应强度较高,同时也对应于图6中相干谱识别出的响应区(灰色与黄色阴影).但是相干谱中的3个月尺度上也存在显著的响应,而增益谱上3个月尺度响应强度不高,仅草地和灌木存在一个较小的峰值,说明短期的干旱事件对草地和灌木植被会产生影响,但是影响程度不大.草地、灌木、阔叶林、针叶林的年增益均高于其他尺度的增益,最大增益值分别为0.20、0.19、0.17和0.12,说明植被变化对长期干旱的响应强度更高,即受长期干旱的影响更大.

另外,不同类型植被的增益值表现为灌木>草地>阔叶林>针叶林,说明灌木是受干旱影响程度最大的植被类型,草地次之.而针叶林受干旱的影响程度最小,原因是针叶林是寒温带的地带性植被,比其他植被类型更加耐寒、耐旱.

**3.3.3 不同类型植被变化对干旱响应的滞后性**  
1982—2019年蒙东地区草地、灌木、阔叶林、针叶林NDVI对SPEI响应的相位谱(图8)显示,大部分频谱的相位滞后为负值,即植被变化滞后于干旱.年

尺度上(365 d左右),草地、灌木、阔叶林、针叶林NDVI变化滞后SPEI的相位分别约为 $-0.27$ 、 $-0.66$ 、 $-1.03$ 和 $-1.54$ 弧度,转化为滞后时间分别为31 d、77 d、120 d和179 d;6个月尺度上(182 d左右),滞后相位分别约为 $-0.34$ 、 $-0.48$ 、 $-1.19$ 和 $-1.78$ 弧度,即滞后时间分别为20 d、28 d、69 d和103 d;3个月尺度上(91 d左右),滞后相位分别约为 $-0.41$ 、 $-1.18$ 、 $-1.96$ 和 $-2.25$ 弧度,滞后时间分别为12 d、34 d、57 d和65 d.可以看出,随着时间尺度增加,各类植被变化对干旱的响应时间变长.然而,在相位谱中仍然检测到正相位,从理论上意味着干旱变化滞后于植被变化.李巧萍和丁一汇(2004)的研究指出,植被变化通过改变地表参数从而影响水分平衡等过程,对我国区域气候有着显著的影响.但在该频率范围内,对应相干谱中的相干性较低,所以无法得出植被调节了气候这一结论,产生正相位的原因可能是由于其他因素(比如人类活动)的影响.

以往对于内蒙古地区植被变化对干旱的滞后性研究相对较少,但从Miao *et al.* (2018)的研究中得知,内蒙古草地变化滞后干旱约1~3个月,森林滞后约2~4个月.本文通过转移函数分析得到了不同时间尺度下植被变化对干旱响应更加精确的滞后时间,无法与之直接对比,但其结果仍可为本文结果提供参考.

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

转移函数分析结果表明,在蒙东地区草地和灌木NDVI与SPEI的相干性更为显著,响应强度较大,响应速度更快,表明干旱的发生对草地和灌木



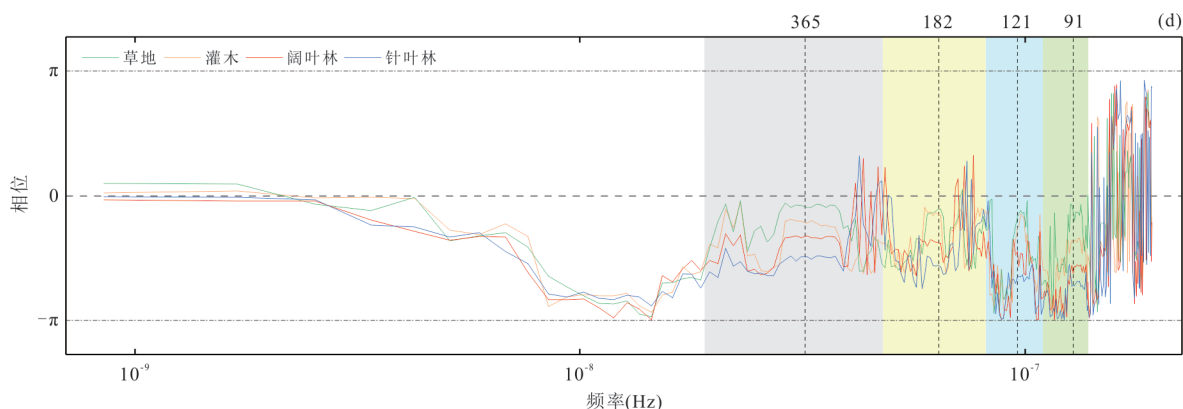


图8 1982—2019年蒙东地区不同类型植被NDVI与SPEI的相位谱

Fig.8 Phase spectrum of NDVI responses to SPEI of different types of vegetation in eastern Inner Mongolia from 1982 to 2019

会产生较大的影响.但由相干谱和增益谱可知,草地NDVI与干旱的相干性和增益值小于灌木,原因可能是由于人类活动的影响(比如放牧);针叶林和阔叶林NDVI与SPEI的相干性较低,其对干旱的抵抗力较强,对干旱的响应时间较长.

干旱发生时,植被通过降低呼吸作用、光合作用、生长速率等方式减少水分流失,以此来适应干旱的胁迫(刘永强, 2016).由于不同植被类型结构与功能不同,其对气候环境的适应能力也不同(Vicente-Serrano *et al.*, 2013).通常草地植被植株小,根系浅,对外界环境干扰敏感,干旱使土壤有效水含量降低,导致草地植被吸水困难,使叶片萎蔫甚至死亡,其受干旱的影响比较大;林地植被叶面积较大,根系较深且发达,使其能够适应干旱,提高干旱胁迫条件下水分储存的能力(Jones *et al.*, 2012).此外,内蒙古地区林地主要分布在东北部地区,已有研究表明该地区温度对植被影响较大,干旱事件对植被的影响很小(穆少杰等, 2012).

20世纪90年代,大兴安岭林区过量的采伐和开荒,让该地林业资源损失较大.从图9和图10可以看出,1990—2000年,针叶林和阔叶林的NDVI呈波动下降趋势,而此时间段内,该地区呈湿润化状态(灰色阴影).因此,NDVI下降的主要原因是人类对林地的破坏.考虑到过度砍伐和开垦带来的不利后果,天然林保护工程于1998年开始试点启动,2000—2010年全面完成了一期工程建设任务(张逸如等, 2021).而在此工程建设期间,针叶林和阔叶林的NDVI呈波动上升趋势,但该地区大部分年份处于干旱状态( $SPEI \leq -0.5$ )(蓝色阴影).所以,在蒙东地区导致针叶林与阔叶林变化的主要原因是人类活动.

本文采用频域技术—转移函数分析(TFA)细致探讨了不同时间尺度下草地、灌木、阔叶林、针叶林4种类型植被的变化与干旱的响应关系,研究表明,该方法可以有效地量化植被变化对干旱响应的存在性、强度和时滞性,并且可以同时识别显著的响应时间尺度.但本文获取的NDVI与SPEI数据集时间分辨率为一个月,频域内能够观测的最短时间尺度为60 d,故后续可以采用长时序且时间频率更高的数据集以便在更短的时间尺度上研究植被变化对干旱的响应特征.此外,本次探索性地采用频域技术—转移函数分析方法针对不同时间尺度下不同类型植被如何响应干旱进行了研究,在后续的工作中还需进一步探讨植被与干旱在空间上的响应情况.

#### 4.2 结论

(1)1982—2019年蒙东地区不同类型植被变化对干旱的响应主要出现在年、6个月和3个月尺度上,草地NDVI与SPEI的相干性在3个尺度上分别为0.44、0.57、0.31,灌木NDVI与SPEI的相干性分别为0.43、0.62、0.32,而阔叶林和针叶林NDVI与SPEI的相干性分别为0.32、0.19、0.14和0.22、0.13、0.10;草地和灌木的NDVI与SPEI的相干性较高,针叶林和阔叶林的NDVI与SPEI的相干性较低.

(2)不同类型植被NDVI在年、6个月尺度上对SPEI的响应强度高于3个月,表现为灌木>草地>阔叶林>针叶林,灌木是受干旱影响程度最大的植被类型,草地次之,而针叶林由于其自身耐寒、耐旱的特性受干旱的影响程度最小.

(3)草地NDVI对干旱的响应速度比其他类型植被快,在年、6个月和3个月尺度上分别滞后干旱31 d、20 d、12 d;灌木NDVI变化在3个尺度上分别

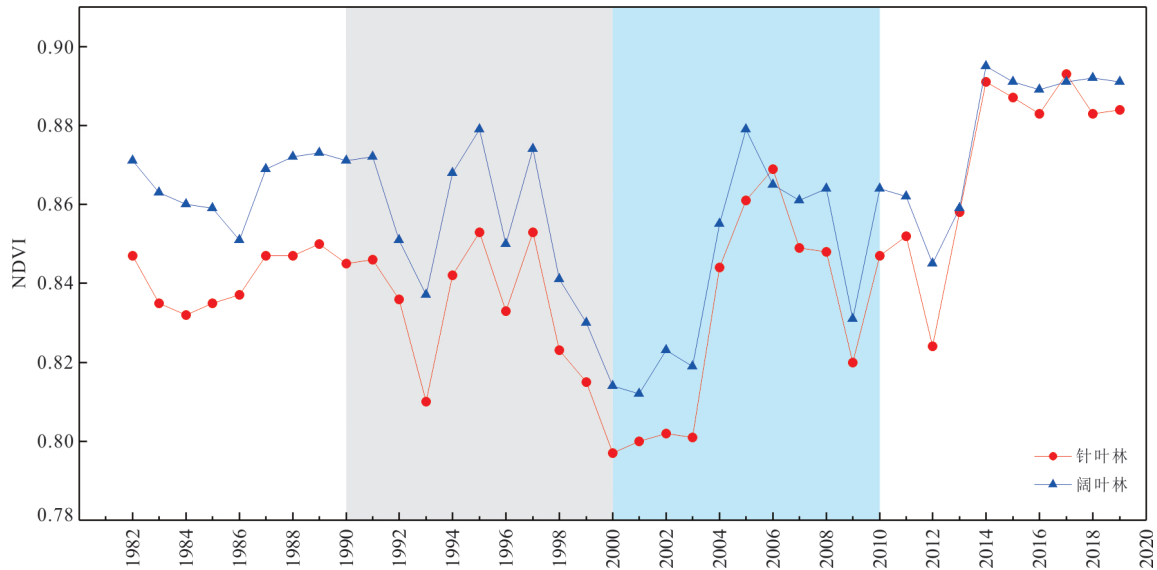


图9 1982—2019年蒙东地区针叶林与阔叶林的NDVI变化

Fig.9 NDVI change of coniferous forest and broad-leaved forest in eastern Inner Mongolia from 1982 to 2019

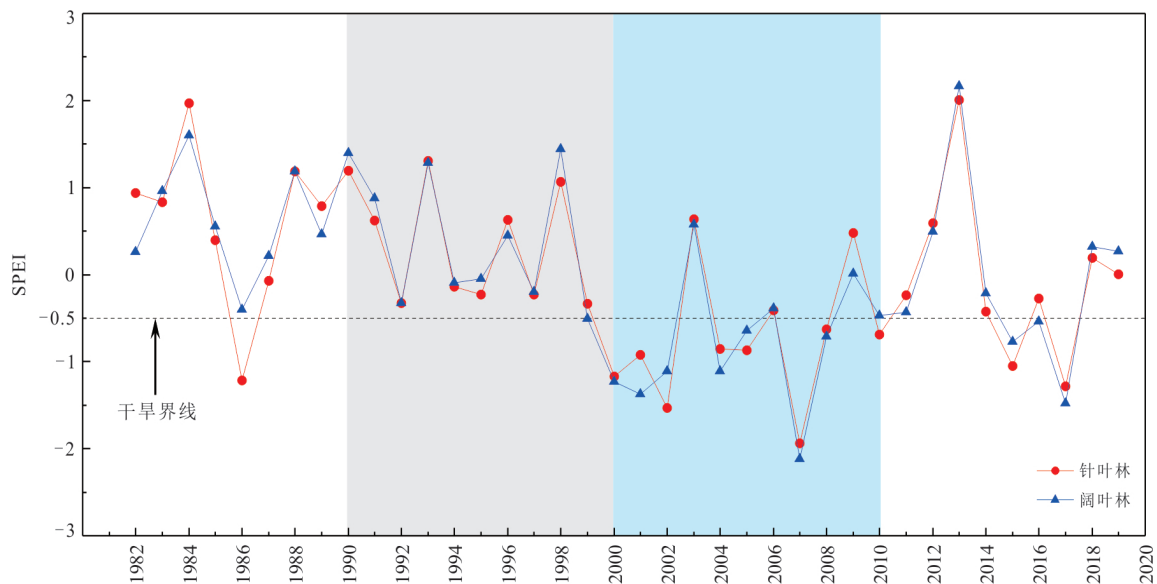


图10 1982—2019年蒙东地区针叶林与阔叶林的SPEI变化

Fig.10 SPEI change of coniferous forest and broad-leaved forest in eastern Inner Mongolia from 1982 to 2019

滞后干旱 77 d、28 d、34 d；阔叶林 NDVI 变化滞后干旱的时间分别为 120 d、69 d、57 d；针叶林 NDVI 对干旱的响应速度最慢，滞后干旱的时间分别为 179 d、103 d、65 d。在内蒙古东部，干旱的发生对草地和灌木会产生较大的影响，而针叶林与阔叶林对干旱的抵抗力较强，受干旱的影响较小。

致谢：感谢匿名审稿专家提供的有益建议！

## References

An, Q., He, H.X., Nie, Q.W., et al., 2020. Spatial and

Temporal Variations of Drought in Inner Mongolia, China. *Water*, 12(6): 1715. <https://doi.org/10.3390/w12061715>

Barbosa, H.A., Lakshmi Kumar, T.V., Paredes, F., et al., 2019. Assessment of Caatinga Response to Drought Using Meteosat-SEVIRI Normalized Difference Vegetation Index (2008–2016). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 148: 235–252. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.12.014>

Beguéria, S., Vicente-Serrano, S.M., Fergus, R., et al., 2014. Standardized Precipitation Evapotranspiration In-

- dex (SPEI) Revisited: Parameter Fitting, Evapotranspiration Models, Tools, Datasets and Drought Monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10): 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Cai, S.H., Song, X.N., Hu, R.H., et al., 2021. Ecosystem-Dependent Responses of Vegetation Coverage on the Tibetan Plateau to Climate Factors and Their Lag Periods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(6): 394. <https://doi.org/10.3390/ijgi10060394>
- Cao, X., Liu, Y., Liu, Q.X., et al., 2018. Estimating the Age and Population Structure of Encroaching Shrubs in Arid/Semiarid Grasslands Using High Spatial Resolution Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 216: 572–585. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.025>
- Claassen, J. A., Meel-van den Abeelen, A. S., Simpson, D. M., et al., 2016. Transfer Function Analysis of Dynamic Cerebral Autoregulation: A White Paper from the International Cerebral Autoregulation Research Network. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 36(4): 665–680. <https://doi.org/10.1177/0271678x15626425>
- Cui, L.F., Wang, L.C., Qu, S., et al., 2020. Impacts of Temperature, Precipitation and Human Activity on Vegetation NDVI in Yangtze River Basin, China. *Earth Science*, 45(6): 1905–1917 (in Chinese with English abstract).
- Dai, S.P., Zhang, B., Wang, H.J., et al., 2010. Analysis on the Spatio-Temporal Variation of Grassland Cover Using SPOT NDVI in Qilian Mountains. *Progress in Geography*, 29(9): 1075–1080 (in Chinese with English abstract).
- Holben, B. N., 1986. Characteristics of Maximum-Value Composite Images from Temporal AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11): 1417–1434. <https://doi.org/10.1080/01431168608948945>
- Huth, R., 2002. Statistical Downscaling of Daily Temperature in Central Europe. *Journal of Climate*, 15(13): 1731–1731. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1731:SDODTI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1731:SDODTI>2.0.CO;2)
- Jia, K., Liang, S.L., Zhang, L., et al., 2014. Forest Cover Classification Using Landsat ETM+ Data and Time Series MODIS NDVI Data-Science Direct. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33: 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.04.015>
- Jones, J. A., Creed, I. F., Hatcher, K. L., et al., 2012. Ecosystem Processes and Human Influences Regulate Streamflow Response to Climate Change at Long-Term Ecological Research Sites. *BioScience*, 62(4): 390–404. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.4.10>
- Khatri-Chhetri, P., Hendryx, S.M., Hartfield, K.A., et al., 2021. Assessing Vegetation Response to Multi-Scalar Drought across the Mojave, Sonoran, Chihuahuan Deserts and Apache Highlands in the Southwest United States. *Remote Sensing*, 13(6): 1103. <https://doi.org/10.3390/rs13061103>
- Kong, D.D., Zhang, Q., Gu, X.H., et al., 2016. Vegetation Responses to Drought at Different Time Scales in China. *Acta Ecologica Sinica*, 36(24): 7908–7918 (in Chinese with English abstract).
- Li, C.L., Filho, W.L., Yin, J., et al., 2018. Assessing Vegetation Response to Multi-Time-Scale Drought across Inner Mongolia Plateau. *Journal of Cleaner Production*, 179: 210–216. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.113>
- Li, Q.P., Ding, Y.H., 2004. Research Progress in the Effect of Vegetation Change on Regional Climate. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, (1): 131–140 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Wen, Z.M., Gang, C.C., 2020. Normalized Difference Vegetation Index of Different Vegetation Cover Types and Its Responses to Climate Change in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 40(2): 678–691 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S.L., Wang, T., Kang, W.P., et al., 2019. Vegetation Change and Its Response to Drought in Inner Mongolia of Northern China from 1998 to 2013. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 11(6): 448–460. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1226.2019.00448>
- Liu, Y.Q., 2016. Impacts of Vegetation on Drought Trends. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 40(1): 142–156 (in Chinese with English abstract).
- Miao, B.L., Li, Z.Y., Liang, C.Z., et al., 2018. Temporal and Spatial Heterogeneity of Drought Impact on Vegetation Growth on the Inner Mongolian Plateau. *The Rangeland Journal*, 40(2): 113–128. <https://doi.org/10.1071/RJ16097>
- Mu, S.J., Li, J.L., Chen, Y.Z., et al., 2012. Spatial Differences of Variations of Vegetation Coverage in Inner Mongolia during 2001–2010. *Acta Geographica Sinica*, 67(9): 1255–1268 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S., Ding, Y., Liu, W., et al., 2019. 1 km Monthly Temperature and Precipitation Dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 11(4): 1931–

1946. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1931-2019>
- Prieto, G.A., Parker, R.L., Vernon, F.L., 2009. A Fortran 90 Library for Multitaper Spectrum Analysis. *Computers and Geosciences*, 35(8): 1701–1710. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.06.007>
- Qin, Y., Zhang, T.B., Yi, G.H., et al., 2021. Remote Sensing Monitoring and Analysis of Influencing Factors of Drought in Inner Mongolia Growing Season since 2000. *Journal of Natural Resources*, 36(2): 459–475 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L.L., Tao, W., Wen, P.K., et al., 2019. Vegetation Change and Its Response to Drought in Inner Mongolia of Northern China from 1998 to 2013. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 11(6): 448–460.
- Sun, Y.L., Guo, P., Yan, X.D., et al., 2010. Dynamics of Vegetation Cover and Its Relationship with Climate Change and Human Activities in Inner Mongolia. *Journal of Natural Resources*, 25(3): 407–414 (in Chinese with English abstract).
- Tollefson, J., 2021. IPCC Climate Report: Earth is Warmer than It's been in 125, 000 Years. *Nature*, 596(7871): 171–172. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02179-1>
- Tong, S.Q., 2019. Spatio-Temporal Variations and Prediction of Meteorological Drought in Inner Mongolia under Climate Change (Dissertation). Northeast Normal University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7): 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vicente-Serrano, S.M., Gouveia, C., Camarero, J.J., et al., 2013. Response of Vegetation to Drought Time-Scales across Global Land Biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(1): 52–57. <https://doi.org/10.1073/pnas.1207068110>
- Vicente-Serrano, S.M., Schrier, G.V., Beguería, S., et al., 2015. Contribution of Precipitation and Reference Evapotranspiration to Drought Indices under Different Climates. *Journal of Hydrology*, 526: 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.025>
- Wang, Q.C., Li, F.X., Liu, B.K., et al., 2015. Variation in Drought and Its Response to Climate Warming in Qinghai Plateau in Recent 50 Years. *Arid Zone Research*, 32(1): 65–72 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, F.F., Wang, L.C., Yao, R., et al., 2018. The Characteristics of Climate Change and Response of Vegetation in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 43(S1): 42–52 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J.Z., Zhou, X., Xiong, J., et al., 2020. Evaluation of NDVI Downscaling Adaptability in Wujiang River Basin, Guizhou. *Remote Sensing Information*, 35(6): 129–137 (in Chinese with English abstract).
- Yang, L.L., 2016. Spatial-Temporal Variation of NDVI and Analysis of Climate Response in the Source Region of the Yellow River from 2000 to 2014 (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Yang, S.C., Yang, H.S., 2019. Drought Evolution and Vegetation Response in Inner Mongolia from 1982 to 2013. *Journal of Natural Disasters*, 28(1): 175–183 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R., Zuckerman, J.H., Giller, C.A., et al., 1998. Transfer Function Analysis of Dynamic Cerebral Autoregulation in Humans. *American Journal of Physiology Heart Circulatory Physiology*, 43(1): H233–H241. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.1998.274.1.H233>
- Zhang, Y.R., Liu, X.T., Gao, W.Q., et al., 2021. Dynamic Changes of Forest Vegetation Carbon Storage and the Characteristics of Carbon Sink (Source) in the Natural Forest Protection Project Region for the Past 20 Years. *Acta Ecologica Sinica*, 41(13): 5093–5105 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, S.B., Sun, Z.H., Di, L.P., 2021. Characteristics of Vegetation Response to Drought in the CONUS Based on Long-Term Remote Sensing and Meteorological Data. *Ecological Indicators*, 127: 107767. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107767>
- Zhou, J., Jia, L., Menenti, M., et al., 2021. Characterizing Vegetation Response to Rainfall at Multiple Temporal Scales in the Sahel-Sudano-Guinean Region Using Transfer Function Analysis. *Remote Sensing of Environment*, 252: 112108. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112108>
- Zuo, D.P., Han, Y.N., Xu, Z.X., et al., 2021. Time-Lag Effects of Climatic Change and Drought on Vegetation Dynamics in an Alpine River Basin of the Tibet Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 600(9): 126532. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126532>

#### 附中文参考文献

- 崔利芳, 王伦澈, 屈赛, 等, 2020. 气温、降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响. *地球科学*, 45(6): 1905–1917.

- 戴声佩, 张勃, 王海军, 等, 2010. 基于SPOT NDVI的祁连山草地植被覆盖时空变化趋势分析. 地理科学进展, 29(9): 1075—1080.
- 孔冬冬, 张强, 顾西辉, 等, 2016. 植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析. 生态学报, 36(24): 7908—7918.
- 李巧萍, 丁一汇, 2004. 植被覆盖变化对区域气候影响的研究进展. 南京气象学院学报, (1): 131—140.
- 刘静, 温仲明, 刚成诚, 2020. 黄土高原不同植被覆被类型NDVI对气候变化的响应. 生态学报, 40(2): 678—691.
- 刘永强, 2016. 植被对干旱趋势的影响. 大气科学, 40(1): 142—156.
- 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等, 2012. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报, 67(9): 1255—1268.
- 覃艺, 张廷斌, 易桂花, 等, 2021. 2000年以来内蒙古生长季旱情变化遥感监测及其影响因素分析. 自然资源学报, 36(2): 459—475.
- 孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬, 等, 2010. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系. 自然资源学报, 25(3): 407—414.
- 佟斯琴, 2019. 气候变化背景下内蒙古地区气象干旱时空演变及预估研究(博士学位论文). 长春: 东北师范大学.
- 汪青春, 李凤霞, 刘宝康, 等, 2015. 近50 a来青海干旱变化及其对气候变暖的响应. 干旱区研究, 32(1): 65—72.
- 向菲菲, 王伦澈, 姚瑞, 等, 2018. 三峡库区气候变化特征及其植被响应. 地球科学, 43(S1): 42—52.
- 杨江州, 周旭, 熊军, 等, 2020. 贵州乌江流域NDVI降尺度适应性评价. 遥感信息, 35(6): 129—137.
- 杨玲莉, 2016. 2000—2014年黄河源区植被NDVI时空变化特征与气候变化响应分析(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 杨舒畅, 杨恒山, 2019. 1982—2013年内蒙古地区干旱变化及植被响应. 自然灾害学报, 28(1): 175—183.
- 张逸如, 刘晓彤, 高文强, 等, 2021. 天然林保护工程区近20年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征. 生态学报, 41(13): 5093—5105.